

特种设备译丛



真空技术与设备

上海市机械综合研究所编

特种设备译丛

真空技术与设备

上海市机械综合研究所編

*

上海市科学技术编译館出版

(上海南昌路59号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

*

开本 850×1156 毫米 1/32 印張 3 1/2 字数 127,000

1965 年12月第1版 1965 年12月第1次印刷

印数 1—3,800

編号 15·343 定价(科七) 0.65 元

目 录

1. 高真空蒸气泵物理評述	(1)
2. 扩散泵的发展	(20)
3. 加擋板系統中的返流	(29)
4. 噴口設計对油扩散泵返流率影响的实验研究	(38)
5. 油扩散泵中的反扩散	(47)
6. 标准小孔在校准真空規中的运用	(56)
7. 罗茨泵(設計与特性)	(71)
8. 机械增压真空泵的最近发展	(82)
9. 超高真空連續蒸发装置的构成和真空特性	(88)
10. 高稳定性自动薄膜真空沉积系統	(106)

1. 高真空蒸汽泵物理

N. A. Florescu

引 言

自从該德(Gaede) 试图用蒸汽流产生高真空以来,半个世紀已經过去了,現在已有可能正确地對高真空蒸汽泵这一最巨大的成就的发展过程作一概述。

該德所断言的认为其扩散泵具有新的工作原理,当时曾經受到責难,也引起了許多爭論。这些情况,大大地阻碍了对此种装置中所发生的抽气作用的了解。因此,在实践上发展很慢,而且是凭經驗的。

简单地說来,用蒸汽来产生高真空的发展过程,经历了如下的阶段。当該德开始他的研究工作前,早已利用水蒸汽在喷射泵中来获得低压强了。然而在大气下进行运转时,一台喷射泵所产生的只不过是压强为几个毫的稀薄大气。該德认为如果滿足下列条件:蒸汽流应在較大气压低得多的压强下进行工作;应该用水銀蒸汽来代替水蒸汽,蒸汽压应相当的低;則高真空即可获得。他所提出的假設已被証实为正确的。朗繆尔采用了类似喷射泵的一种設計,这种設計具备了該德的上述条件,并使蒸汽流离开噴口而散布出来。其中后一特点对于在很低压强下获得高抽速說来具有决定性的意义。直到現在这个設計虽然經過許多的改进,基本上仍保持不变。

虽則朗繆尔應該得到給出了正确解答的荣誉,但是該德的开拓性工作,促进了今天的蒸汽泵,成就是不可磨滅的。本文的目的就是要对蒸汽真空泵发展过程中的杰出貢獻作一永恒的記載。

历史概略

1690年 Denis Papin 在 1674年 Christian Huygens 早曾建議的装置中,利用水蒸汽得到了真空。蒸汽在带有活塞的气缸的底部引入,活塞因受蒸汽压力而被推向上。使整个气缸充滿着水蒸汽,由于气缸內所含水蒸汽的冷凝而获得了真空。然而,Papin 的兴趣并非在于真空本身,他只制出了能够利用大气压强来产生活塞运动的装置。这也就是最初的蒸汽引擎的原理。

以后,按同一条思路来产生真空的适当装置不断提出。但是最方便的利

用水蒸气产生真空的方法，即水蒸气喷射，是在上世紀发明的，它与水喷射泵*相似。这个方法已成为工业上及实验上所实用的方法。

由于对水蒸气及水喷射泵的工作原理缺少了解，因而有认为这种设备不适用于产生很低压强的说法。这些说法认为水蒸气喷射泵是在大气压强下进行工作的，不可能期望在进、出口之间能维持很大的压力差。且当出口压强降低时，射流就散布开来，因而大大地阻碍了气体进入射流。然而，不很强烈的射流能在較低的压强下进行工作，增加扩散器的尺寸可以消除任何蒸气散布的不良影响，这样可得到更大的抽速。由这一论点可见，问题是简单的。也象在许多其他场合下一样，在高真空蒸气泵的发展过程中，逻辑推理并不先行于实物构造。可以指出，当用水银来工作时，配上一个加热炉和接上一台前级泵就可以使水喷射泵作为高真空泵之用。关于这点，已为一简单实验^[3]所证实。但不幸在真空领域中这一实验的直接的证明来得太迟了。

第一个试图用水银蒸气来改进真空获得的是 Lebedew^[4]。他所描述的程序如下：

将水银倒入已抽空的容器(V)中(图1)。并将水银用水槽(K_1)加热到超过室温 5°C ，使水银蒸馏入运转的泵的同时，带走容器内的气体。然后将泵隔离，并在(K_1)及(K_2)加入冷却剂，则容器(V)中也就得到了很低的压强。

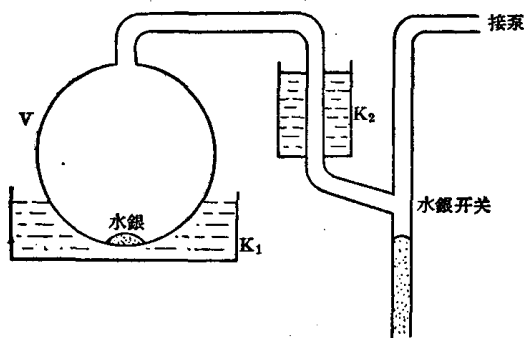


图1 Lebedew 用水银蒸气流来改进真空的装置

Magnus^[5]报道过水银蒸气流排除气体作用的类似观察。显然这种得到高真空的可能性是不会有应用价值的。其后该德^[6]就利用了这个设想，1913年9月25日，在德国申请了一项专利，其中他描述了一项用水银蒸气流来产生高真空的装置。他指出，高真空是通过扩散作用而得到的，因此他申请，置备扩散膜是这项发明的主要部分。因此，他的泵以扩散泵而闻名。

该德宣称他已发明了一种能产生无限高真空的装置，在当时引起了极大

* 水喷射泵是 James Thomson 在 1852 年首先应用的。

的兴趣,因为这样一种泵对研究工作及技术工作均极为需要。这种新泵的缺点是抽速太小,因而显然有待改进。

朗穆尔^[7]应在成功地改进喷射泵使能以大抽速产生高真空方面获得荣誉。他说他的泵与水蒸气喷射泵不同,他的泵在工作时能防止形成任何与气体流反向的蒸气流。因此,他为了使蒸气得到冷凝而冷却扩散器。由于假定这个过程在泵作用中是基本的,所以他把这一装置称之为冷凝泵。

冷凝泵出现后,扩散泵就变成陈旧了。此后不久,Crawford^[8]证明了朗穆尔泵的工作与水蒸气喷射泵是一致的。在其后三十余年中,蒸气泵的发展是凭经验的,因此进展很慢。对其有可能产生低于 10^{-8} 毛压强一节,当时仍缺乏理论上以及实验的证明。只有在近十余年来才确定了蒸气泵的全部性能。

該德的初始研究

在本世纪之初,还没有适当的设备来获得及测量很低的压强,因此,对稀薄气体的知识是很少的。由于缺乏科学研究,不可避免地对气体在低压下的性态有很多不正确的描述。从消除不正确结论的企图,引起了用水银蒸气来产生高真空这个设想。

作为一例,我们来讨论一件具有历史意义的事情。取一台水银密封泵,例如,Toepler 泵或圆筒泵,通过管子与容器相连接。气体将从容器排出,但同时会有水银蒸气扩散入容器。最后,容器将包含很低压强的气体以及在室温下的饱和水银蒸气。在这样的平衡状态下,泵中的和容器中的总压强以及分压强都是相等的。由分子杂乱无序的运动显然可得此结果。

现设将连接管用液态空气冷却。则水银蒸气实际上将被阻止流入容器。此时,容器中的压强是多少就显然是一个问题。六十年前大家所接受的想法是容器中的气体压强不能低于水银蒸气的饱和压强,因为在泵中以及在容器中的总压强应该相等。然而实际上在这种装置中,用麦克劳真空规可测得气体的分压强比水银的饱和蒸气压强要小得多。该德^[10]从实验上澄清了这种矛盾。

上面的说法在相当高的压强下,是部分正确的。因为分子碰撞频繁,由于水银在冷阱中冷凝,蒸气流将把气体分子撞回去,结果就产生了压力梯度。因此,容器中的气体压强比泵中的高。反之,在低压强下,气体分子运动受到蒸气分子的影响就很少。因而从容器来的气体将几乎不受阻碍地膨胀出容器之外,然后被泵抽除。但是,蒸气分子却被阻止进入容器。只要泵中气体分压强很低,容器中的气体压强能变为很低,尽管泵中的总压强可能比容器中的高,这一点并不足为奇,因为在低压下气体与蒸气的性态互不相干。

設 P , P'_v 及 P_u , P_v 各为气体及水銀蒸气在容器中及泵中的分压强。考虑从泵到冷阱的蒸气流,并应用流体动力学理論,該德获得了下列关系式:

$$P_u + P_v = P + P'_v + \frac{760 D \log(P/P_u)}{r \left[\left(\frac{r}{8\eta} \right) \left(\frac{P_v + P'_v}{2} \right) + \left(\frac{1}{2\nu} \right) \right]} \quad (1)$$

其中 r 为連接管半徑, ν 为管壁摩擦系数, η 为粘滯系数, D 为扩散系数。此式指出,泵中的及容器中的总压强差依赖于压强范围以及連接管的半徑。在低压范围内以及当 r 較小时,上式中的后一项相当可观,故在泵中的总压强 ($P_u + P_v$) 要比容器中的总压强 ($P + P'_v$) 为高。这一結果,在真空技术的发展中証实有重要的价值,它指出了,气流是由分压强的压力梯度支配,而并非由总压强支配。

該德还設法計算了气体扩散入蒸气中的体积率 V 。假設不含有气体的蒸气由长度为 L 的連接管的一端进入,而不含有蒸气的气体进入管的另一端,他得到了下列表达式:

$$V = \frac{\pi r^3}{2L\nu_1} \exp \left(-\frac{rP_v}{1520D\nu_2} \right) \quad (2)$$

其中 ν_1 及 ν_2 分别为气体及蒸气的摩擦系数。从上式得到的主要的結論是,气流的体积率依赖于連接管的半徑而与气体压强无关。若 r 值增大,則 V 趋近于零;但在某一值 r_m 下 V 具有极大值。显然,若将大量的小孔管并联起来,則 V 可以增大。要达到这一点,可以采用一多孔膜,使气体通过此膜而扩散入蒸气。关系式(2)也表明, V 的最大值决定于因子 $r \cdot P_v$ 。因为高效率要求 r 大,蒸气压就必须低。

該德的研究成果是十分令人感兴趣的。因为它表明扩散作用是在当沿着連接管的气体压强的压力梯度消失时才停止的,故可以推知,只有当容器中无气体时,亦即气体完全排出时,气体扩散入不含有气体的蒸气的作用方告停止。因此,該德得出結論,可以有效地利用气体扩散入蒸气流的过程来抽气。他将这样一种装置称之为扩散泵。但不幸的是,該德把制得不含有气体的蒸气看成是一件容易事,并且,他没有研究蒸气流带走气体的过程。

該德的扩散泵理論

图2为该德泵的原理說明图。不含有气体的水銀蒸气通过直管而流动,而此直管又通过一側管与待抽容器相連接。冷却連接的側管阻止了蒸气分子进入容器。而气体分子将不断地从容器扩散入蒸气流,并当这些气体分子在到达二管相接处(A)时,則被蒸气流带走。

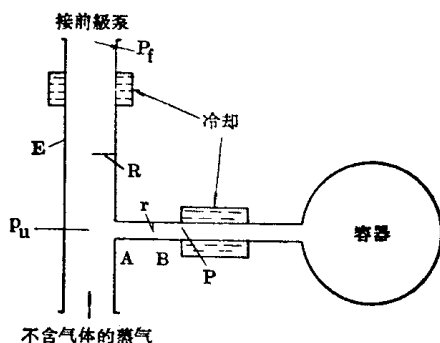


图2 用扩散原理进行抽真空

从式(1)可求得气体在(A)(B)二点的分压比 P_u/P 。假定(B)点的分压与容器中的相等。又假定通过冷却后在(B)点的蒸气压 P_v 可以忽略。于是有:

$$\frac{P_u}{P} = \exp \left[\frac{\left(\frac{r^2 P_v}{16\eta} + \frac{r}{2v} \right) (P_v - \Delta P_v)}{760 D} \right] \quad (3)$$

其中 ΔP_v 为气体反向流动而使蒸气压减低的值。此式表达由于反向的蒸气流而使(B)(A)之间产生压力梯度,这是该德理论的主要结果。数值计算结果表明,对小 r 值而言,此比值并不大。因为蒸气中的气体分压强 P_u 可忽略不计,故在容器中获得极低的压强。然而,若 r 大时,比值 P/P_u 就不能忽视。这说明该德的装置不适宜用于高抽速;要达到高抽速要用大孔口。

同时,在管子的(E)处也有类似的过程。蒸气在未达前级泵前先行冷凝。从前级压强端来的压强为 P_f 的气体将向蒸气流扩散。因此气体压强 P_u 及 P_f 的比由相似于式(3)的关系式给出

$$\frac{P_u}{P_f} = \beta \quad (4)$$

由于管(E)处的半径 R 大,故在相当小的蒸气压强 P_v 下, β 趋近于很小值。因此, P_u 可保持很低。

其次,该德考虑气流从(A)到(B)通过一半径为 r 的理想孔口,计算了扩散泵抽速。由于蒸汽从(A)到(B)沿相反方向膨胀,故气体分子中有一部分 α 被撞击回去。因此体积率的净值等于:

$$S_1 = \alpha C_0 \quad (5)$$

其中 C_0 为孔口的气导,而 $\alpha < 1$ 。他发现 α 为 r/λ 的函数,其中 λ 为气体分子在膨胀着的蒸气中的平均自由程。此函数指出,对于 $\lambda \geq 2r$ 有最佳速率。

該德还設想,到达(4)处的气体分子通常只有一部分 $k < 1$ 被蒸气流帶离(4)处。这是在(4)处所形成的压强 P_u 的另一来源。那些“反抗”的气体分子則能沿側管以最大速率,即 $\alpha = 1$, 通过孔口而回去,因为这时沒有蒸氣分子阻擋它們。因此,回轉去的气流速率为:

$$S_2 = C_0 \quad (6)$$

于是,通过孔口的气体流量净值 Q 由下式給出:

$$Q = SP = kS_1P - S_2P_u \quad (7)$$

考虑到式(5)及(6),就得到:

$$S = C_0[k\alpha - (P_u/P)] \quad (8)$$

若将 P_u 代以(4)式所給出的值,則最后有:

$$S = C_0\left(k\alpha - \beta \frac{P_f}{P}\right) \quad (9)$$

此式指出,泵的最佳速率决定于孔口尺寸(因数 α)以及蒸气压(因数 β)。該德計算中唯一指出蒸气流抽除作用的因数是 k 。他假設 $k = 0.08$ 。因此,即使在最佳条件 $\alpha = 1$ 时,亦不能获得 1 升/秒的抽速。

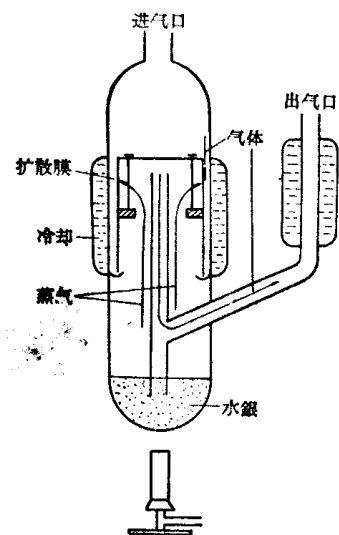


图3 該德的扩散泵

要抽速大,就必須泵的孔口大。为了滿足条件 $\lambda \geq 2r$, 并同时能允許有較高的蒸气压,就必須使 β 值保持很小,該德建議蒸气流的速度应比分子速度大。

气体扩散現象与抽气作用

該德在蒸氣泵原理方面的观点可綜述如下:“只有通过蒸氣及气体的扩散才可获得連續的抽气作用”^[10]。然而,这个概念需要用現代的知識来加以澄清。

眞空抽气的意义是将气体分子从一封閉空間排除出去。这一作用由于分子的热运动而有了可能。杂乱无序运动的結果是使气体膨脹入任何給定空間,因为气体中在通常情況下沒有特殊的方向而有建立均勻的分子分布的趋向。

因此,抽空一容器可使气体分子膨脹通过孔口而进入眞空泵,眞空泵装置或者能够將来自容器的气体分子捕集(吸收或冷凝),或者借压力梯度將它們排除。这就是眞空泵的基本作用。只要泵与容器之間存在着压力梯度,抽气作用將不断发生。

由这一說明显然可知,排气过程只不过是連續而持久不变地排除气体分

子的一种效应。因此，“气体从容器中膨胀出来”并不与“抽气作用”同义。

在蒸气泵中，气体膨胀入充满蒸气的空间。要获得这种扩散现象的基本要求是：维持蒸气中的气体分压低于容器中的气体压强。这也证实了抽气作用最后是由气体为蒸气流带走所决定的。

象这样一种说法：“缓慢的扩散过程应代以另一个能将来自容器的气体分子较快地带入水银蒸汽的过程”，在目前是不能接受的。因为要气体互相渗透，除扩散作用以外，别无他法。显然，为了使气体能最佳地扩散入蒸气，须要若干条件。改善这个过程可以提高泵的性能。但这也并不能包括一切。达到有效工作的更重要的条件是：要使蒸气流带走气体的速率不低于气体扩散入蒸气流的速度。

朗穆尔^[1]不仅给出了迄今仍在使用的泵的正确特性，且还指出了气体被蒸气流带走作用的重要性，这一作用已被证明是蒸气泵工作中的基本要求。

朗穆尔冷凝泵理论

朗穆尔^[12]在描述他的泵时已清楚地指出了在蒸气泵中所发生的二个过程：(1)气体进入蒸气流；(2)这些气体不断地被蒸气流带走。他指出了前一过程在该德扩散泵中严重地限制着抽速，因此“可以寻求别的方法来将被抽气体引入水银蒸气流”。至于后一过程，则与商品水蒸气喷射泵中所发生的过程基本上相似。

在他以前所作的研究结果引起了这样的想法，想用贝努利效应来作为替代过程，“借此气体进入水银蒸气射流”。然而，由于下列两个原因，他否认这一可能。首先，只要射流中的气体压强低于被抽容器中的气体压强，喷射泵的气体是被“吸入射流”的。于是他推断“由于射流中的压强总是相当可观的，因此很明显，贝努利效应不能直接用于获得高真空”。第二，射流进入高真空时必定向侧向散布，这现象阻碍了“在低压下气体吸入射流”。

朗穆尔确信，在高真空喷射泵中贝努利效应之所以不成立，是由于冷凝在扩散器壁上的水银重新蒸发所致。重新蒸发的水银分子成为气体进入蒸气流障碍。只有用冷却扩散器的方法来消除这种逆向的喷射气流才可能得到抽气作用。“在泵的工

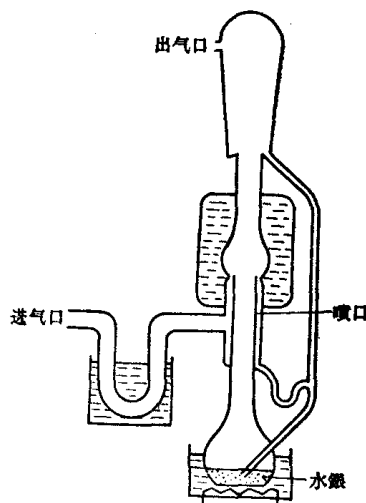


图4 朗穆尔的冷凝泵

作中最主要的一点似乎是扩散器中水銀蒸气的冷凝”以及“在此区域内保持足够低的温度,俾使被冷凝水銀不致再重新蒸发”。

他的結論认为,喷射泵与他称之为冷凝泵的设计之間所存在的唯一区别,在于他在扩散器壁上加了冷却。

虽然上述有关“冷凝泵”工作的說法之中存在着許多不正确的地方,但这种泵的设计却实际上沒有改变地保留下来。成为朗穆尔的不朽紀念。

其他的理論貢獻

該德求得了在低速时气体扩散入蒸气流的最佳条件,而在低速时,麦克斯韦分布律仍能适用。高速蒸气流的情况曾由 Molthan^[13] 研究过,他发现即使满足了該德的准則 $\lambda/2r \geq 1$, 气体进入蒸气的效率也很低。例如只有四分之一气体分子,能以最可几速度运动进入压强为 1 毛的蒸气中。但幸而这个悲观的結論从未被实验所証实过。

根据观察,当周圍压强較高时,可得到直綫射流,而在周圍压强很低时則得到的是发散的射流。Molthan 由这些观察結果推断,认为同一台泵,在較高的压强下是按喷射原理进行工作的,而在很低的压强下则是按扩散原理进行工作的。这就是說在某一中間的压强範圍內,泵或是按两种原理工作,或者根本不工作。可是沒有一种推断是可接受的。

而該德的观点,抽气作用是由于气体扩散入蒸气所引起的,在某些範圍內被接受了,似乎蒸气泵中所能得到的极限压强与蒸气流的作用頗有关系。这可从下列事实推論:在泵工作时,蒸气流使气体沿泵壁維持了一压力梯度。因此, Wertenstein^[14] 认为扩散入蒸气的气体是以与蒸气流相同的速度 U 被蒸气流带走。同时,气体也发生反扩散。設通过距离为 x 处的单位面积,由上述两个过程所带走的气体流量率各为 nU 及 $D(dn/dx)$, 其中 n 为在所考虑的截面上气体的分子密度,而 D 为扩散系数。只要不等式 $nU > D(dn/dx)$ 成立,則泵就有排除气体的作用。极限压强将在平衡状态下达到,即当

$$nU = D \frac{dn}{dx} \quad (10)$$

計算表明, $DN = D_0 = \text{常数}$, N 为蒸气的分子密度。如果設 N 沿整个长度为 L 的射流为常数(此假設在实际上不可能滿足),并計及

$$\frac{dn}{n} = \frac{dp}{p},$$

則將式(10)积分后即可求得

$$P_u = P_l \exp\left(-\frac{NUL}{D_0}\right) \quad (11)$$

其中 P_u 及 P_l 各为极限压强及前級压强。

Matricon^[15] 及 Jaeckel^[16] 在后来应用了类似的推理。

早就有了可以肯定存在这两个相反的过程的实验证明。Hertz^[17] 曾企图利用被蒸气流所带走的气体的反扩散来分离氦的同位素。但在蒸气泵工作时,为了得到很低的极限压强,要大大减低气体的反扩散。若在(11)式中取适当的 N, U 值时满足此条件,则上述推理可以是正确的。采用有关各因子的适当值进行数值计算,可得下述结果:

(a) 对氦来说,比值 P_u/P_f 数量级为 10^{-2} 。但对一台不完美的单级泵,在前级压强高达 10^{-2} 托进行工作时,可发现此值为 10^{-5} ^[18]。

(b) 氦气的 P_u 值较空气要高得多。但这一结论与排气过程所得的结果有矛盾。设我们考虑一抽速为 S 的蒸汽泵为一容积是 V 的容器排气。则在 t 时,容器中的压强由下式给出

$$P = \frac{Q}{S} + \left(P_0 - \frac{Q}{S}\right) \exp\left(-\frac{St}{V}\right) \quad (12)$$

其中 Q 为吸附气体放气率,而 P_0 为初始压力。因为轻质量的气体的 S 值较大,故容器中所得到的平衡压强对氦气说来要比对空气的为低。

(c) P_u 决定于 D , 而非决定于蒸汽及气体分子的分子质量。这表明,质量小的蒸汽分子比质量大的工作更为有效。

蒸气泵的碰撞理论

即使接受了认为极限压强就是被蒸气向前带走的气体分子与通过蒸气而反向扩散的气体分子达成平衡时的压强的观点。对于蒸气流所能带走的气体体积率仍得不到结果。我们已看到,该德简单地假定了:泵的抽速是由泵的理想孔口的气导所给出,并受到表征气体扩散及气体带走等二种过程的效率的某些因子的影响。这一假定,即使在推广到计及蒸气反向散布的影响时^[16],仍保留未变。

因此显然需要有一个新的概念,它能够定量地描述蒸气泵的工作。在发展一个新的理论之时,最主要的是要消除所有以前的错误概念。就蒸气泵而论,认为这种泵在较高及较低的压强下分别按不同的原理工作的说法是经不起实际考验的。

另一方面来说,任何一个可以接受的假设必须与抽气原理的定义相符合。而真空获得设备的基本特点是要能够维持一个压力梯度,并借此梯度将气体抽除。这些作用的实验结果也早已有报道^[19-22]。

根据上述这些观点, Florescu 在 1952 年提出了蒸气泵理论^[23], 这一理论假设:抽气效应是由于蒸气分子与在蒸气流中所出现的气体分子之间的碰撞而得到抽除气体的结果的。蒸气射流通过蒸气分子对气体分子的连续碰撞

而同时完成二个作用。第一,是保持气体分子密度的梯度,密度顺着气流方向增加。第二,进入射流的气体分子被移向前级压强出口。其中前一作用的效率由达到的极限压强所决定;后一作用则决定于抽速。实验证实了在泵中所发生的基本过程受制于蒸气射流。这是蒸气分子的碰撞作用的有力证明。

当泵进口封闭时,只要在出口外的压强 P_f 保持在某一临界值之下。稳定状态是由沿泵壁气体浓度的不变的梯度来表示的,在此条件时,在泵体的任何截面上,由压力梯度而生的气体分子动量与蒸气分子动量之间将达成动力平衡。这一概念的数学表示导致表示极限压强 P_u 的如下关系式:

$$P_u = P_f \exp \left(- \sqrt{\frac{3\pi}{2}} \rho^2 N \frac{MU}{mC} \cdot \frac{\psi(\alpha)}{\alpha} L \right) \quad (13)$$

其中 ρ 为蒸气分子的半径, N 为离开喷口的蒸气分子密度, MU 及 mC 各为蒸气分子及气体分子的动量; $\psi(\alpha)$ 为一无量纲函数, α 为蒸气分子的均方根速度与气体分子的最可几速度之比值, L 为泵体长度。

主要的理论结论是:若在上述公式中选取适当的一组因子,则蒸气泵的极限压强可能变得很低。若是破坏平衡而使气体分子有利于流向蒸气流,则将得到较高的极限压强。上述结果与扩散理论(式(11))之间最显著的差别是在于极限压强依赖于气体的分子质量。(13)式表明,当抽除轻的气体时,所得的极限压强较低,此结果与这种气体的抽速较高这一事实是相符的。

抽除气体的过程可由计算为流动的蒸气分子碰撞而移向前级压强出口的气体分子数来进行分析。若假定在喷口之前,气体能保持很低的压强 P'_u ,则可得被抽除气体的体积率 R 的如下表达式:

$$R = \sqrt{\frac{3\pi}{2}} \cdot \beta \rho^2 N U l A \sqrt{\frac{M}{m}} \cdot \frac{\psi(\alpha)}{\alpha} [1 - (P'_u/P)] \quad (14)$$

其中 β 为蒸气射流的抽除效率, l 是分子密度为 N 的射流的长度, P 为进入射流的气体压强。

在(14)式中合理选取各因子的数值以计算 R 表明,被泵所抽除的气体流量能比进入蒸气流的气体流量大。

因此,在正常工作条件下,泵的最大抽速 S 是决定于通过泵头气导 $C = fC_0$ 的流量的。在实际的泵中,气体流量受蒸气反向散布的影响而降低。于是我们有:

$$S = \gamma C [1 - (P'_u/P)] = \gamma f C_0 [1 - (P'_u/P)] \quad (15)$$

其中 $\gamma < 1$, 而 P 为进口压强。只要使 N 及 U 足够大,能保持 P'_u 值低时,则泵的抽速主要受二个因子的限制: f 影响气流流往抽气孔口, γ 影响气体扩散入蒸气。其中,后一结果证明了以前对气体扩散入蒸气所作的乐观估计。但

是,認識到气体抽除过程的重要性,得到了低压范围内的性能的改善。

值得指出,蒸气泵工作与碰撞理論相符的观点,Smith^[24]在很久以前就提出过。他強調指出,必須使組成射流的蒸气分子在初始运动时即具有高度的持久运动力。要达到这种有方向性的效果,只須給被推动的蒸气分子以較大的动量。或是給与蒸气分子以較大的初始速度,或采用质量較大的蒸气分子,或者二者都用。这样被推动的蒸气分子在喪失其方向性效果之前,就能与更多的气体分子碰撞。

抽速表达式

有必要对(8)式与(15)式之歧异加以說明。前者是該德的抽速公式,其中 $ka < 1$, 是假定表征抽气作用效率的一个系数;后者則是由碰撞理論給出的。

通过泵的气体流量为 Q , 从(8)式可得:

$$Q = SP = C_0(kaP - P_u) = C_0(P' - P_u) \quad (16)$$

此处

$$P' = kaP \quad (17)$$

且滿足条件

$$P > P' > P_u \quad (18)$$

現考虑連接于抽气孔口的气导 C , 并定义为:

$$Q = C(P - P') \quad (19)$$

从(16)及(19)式,代替式(8)得到:

$$S = \left(\frac{CC_0}{C + C_0} \right) \left(1 - \frac{P_u}{P} \right) \quad (20)$$

注意到 $f = C/(C + C_0)$, 可見如 $\gamma = 1$, 即假設抽气作用是完全的, 則(15)及(20)两式是等价的。因此,該德所用的因子 ka 并不影响抽气作用。它只簡單表示連接于孔口的气导对抽速的影响而已。

从(17)及(18)式可見

$$ka > \frac{P_u}{P} \quad (21)$$

此不等式表明,由(8)式所給出的 S 值决不会是負值,如以前錯誤地假定过的那样^[26]。

目前的蒸汽泵

理論和实验相一致的結果,使得我們有可能提出如下的蒸气泵的工作原理^[26]。

将适当的流体在加热炉內产生蒸气,导入噴口,并从噴口噴射出来而进

入冷凝器或扩散器。噴口的布置使蒸气离开連接被抽容器的进气口。气体分子借扩散作用而进入蒸气流。气体分子一进入射流以后,則就很少有机会流回,只能被蒸气带走并被压缩,至于驅動的蒸气則冷凝而回到加热炉供重复使用。然后,前級泵将气体分子排除至大气中。因此气体压强从进气口向出气口方向增加(出气口处为前級压强),泵的主要作用則是将气体分子带过激波边界。其所得到的抽气效应由某一泵速来表示。在临界前級压强时,激波边界靠近于噴口的开口,因而可能发生气体分子反逸现象。当前級压强降低时,此激波边界則从噴口外移直到消失。此时的射流保持着压强增加的梯度,在这种情况下,进口压强与前級压强的关系由(13)式表达。

虽提出过的建議很多,但在实际的各种型式蒸气泵中只結合采用了其中的一部分。并非所有蒸气泵都具有同样的特点。这在不脱离泵的工作基本原理条件下,給予各种泵型采用不同的结构及改进有很大的选择余地。

为得到优良性能,必須进行广泛的研究工作,其目的在于改进此种設備在工作时所包含的基本过程。下面我們將說明有关的一些工作:

- (1) 气体扩散入蒸气流,
- (2) 产生不含有气体的蒸气,
- (3) 气体被蒸气射流所抽除。

1. 气体扩散入蒸气流

限制着蒸气泵效率的是气体扩散入蒸气流的过程。我們早就指出过,該德的理論是要想求出气体最佳的扩散条件。随着該德的开拓性工作之后,对設計泵所作的改进实际上就是各种改善这个过程的建议。朗繆尔提倡了用冷却扩散器的办法来适当冷凝蒸气; Crawford 提議产生一种蒸气射流,其中分子作平行等速运动,这样气体分子只要进入射流就能有效地防止反回。最近以来,提出有这样的見解,认为在高真空蒸气泵中气体是扩散入整个射流的。而在噴射泵中則由于蒸气密度較高,气体則仅渗入射流的边缘^[27]。然而,基本的事实是噴射泵所采用的是直的蒸气射流。这不同于在很低压强下工作的泵中散布开来的射流,后者具有較大的面积可供气体进入蒸气流。从流体动力学考虑,曾得出結論^[28],认为在离噴口的很短距离内,射流中并无气体分子存在。但是,实验証实在噴口前面有气体分压强^[29],它和泵抽除气体的速度有关。

这些努力虽則值得推荐,但蒸气流在离开噴口后,由于周圍是低压强而膨胀时,却有散布过开的趋势,特別是在近噴口唇处。Molthan^[13] 早就已經指出,蒸气流从管道射入高真空时,因其周界层分子受到噴口壁的摩擦,速度較小,不可避免地会过分发散。他相信,这些反向散布的蒸气分子对于扩散着的气体分子的速率并无影响。然而,实验証明指出,散布过开的蒸气分子^[30],以及从泵壁上反射回来的分子^[31],都击回气体分子,因而影响了泵的抽速。即

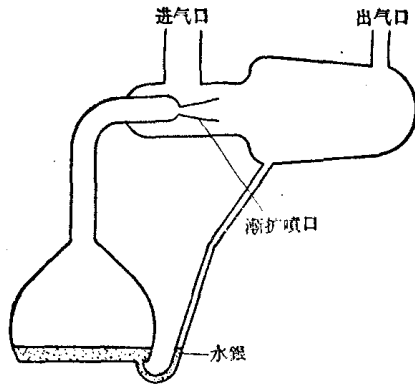


图5 Crawford 的平行喷射蒸汽泵

即使是正常强度的射流,也有可觉察的散布过开现象存在。

要防止蒸气散布过开,而不妨碍必需的散布或抽气作用,也不影响气体扩散,较简便的方法是采用一种其周界层具有高喷射速度的射流,且其浓度从周界层向中心增加。这个设想已借双重喷嘴而实现^[32]。

对于降低散布过开所作的尝试倒是很多的。该德^[33]是第一个建议对朗缪尔泵采用这种改进的。他强调指出,朗缪尔泵实际上是扩散泵^[34]。其方法是在沿喷嘴周围装设一冷却帽。这样一来,趋向于反流的蒸气就冷凝在喷射源的附近。这种装置的全部内在关系直到很久以后,当改进大型泵的抽速至30%时,才弄清楚^[30]。

蒸气反向散布不仅影响泵的性能,而且它还是构成蒸气连续逸出与泵所连接的系统中去的主要根源。这一效应是蒸气泵所固有的,但其大小却与泵的设计大小有关系。显然,蒸气移逸量是随着反向散布降低同时降低的。但是,移逸在一般情况下可借装适当的档板降低蒸气分子的速度而防止。同时这样还有一个好处,可防止泵壁上油液的倒爬。

与气体扩散并不直接有关,但也影响着抽速的是泵头的流阻,如(15)式所示。多数设计都忽视了这个因素。用增加泵头气导的办法,曾获得增加抽速25%的成效^[35]。

2. 不含有气体的水银蒸气流

不含有气体的水银蒸气流实际上是能获得的。就这一点来说,水银是一种理想的工作液体。随着蒸气压很低可替代水银的特种油类^[36]的出现,产生如蒸气泵中所要求的不含气体的蒸气就变得困难了。

在泵工作的时候,工作液体是作连续循环的。工作油液所携带的形式为气体,蒸气或溶解气体的工作油液的热分解物,不可避免地要沾污从高真空喷

口射出的蒸气。这样,泵的极限压强就受制于沾污物的总压强。然而,若阻止这些气体及轻质蒸气不使达到高真空级时,则实际上极限压强是沒有限制的。通常,一部分沾污物能排出泵外,另一部分沾污物则聚积在前级压强级,但也有一小部分仍无法加以控制。

一种能够按照上述思路进行工作的最初设计,曾由 Burch 及 Baneroft^[37] 描述过。以后, Hickman^[38] 建议,改进的设计应具有基于分馏机理的两个特点:采用多隔层的加热炉或分离式的加热炉使得油液的成分能按一定等级分离;同时并用分馏式管道俾在油液重新蒸发前加以纯化。因此,工作油液循序从喷射级的加热炉而流入高真空级的加热炉时,因蒸汽压高的成分已蒸发掉,所以就只有蒸汽压低的成分被输送至高真空射流中。从一只加热炉到另一只加热炉的无从控制的渗漏或是油流太快都只能对分馏作用起有害的影响。

油液的纯化,也就是除去油液所含的气体及挥发性成分,包括用射流将其送至前级压强端以阻止它们回到加热炉;采用使蒸汽流通过一侧向喷射器的喷口喷射出,并用阱捕集那些不必要的气体^[39],及使回返的流体沿着一条很长的温度保持得相当高的途径回返等的方法^[40,41]。

对加热现象所作的简单分析表明,在采用分隔层式的加热炉的蒸汽泵中不可能得到完全的分馏作用。因此,提出了一些改进通常的分馏装置的新建议^[42,43]。

分馏及纯化只不过是权宜之计,以缓和油液性质的不完全。现在,已有完全可用的油液^[44,45]。蒸汽压极低的完全稳定的油液,不但可以简化泵的结构,而且还将大大增加蒸汽泵的应用范围。因此,若能找到理想的工作泵液,则近 25 年来大多数对这种泵所作的改进均将成为无用的了。

3. 气体被蒸气喷射所抽除

Crawford^[46] 首先尝试改进朗缪尔的设计,他成功地利用了拉伐尔喷口,这样就证实了高真空蒸汽泵并非别物,只不过是较低的前级压强进行工作的喷射泵而已。由下列事实也可以肯定这一点:在高真空泵工作之时,扩散器的冷却并非主要环节,而只为改进泵的效率特别是当采用蒸汽压相当高的工作泵液时,才有需要。

系统的研究证明所有的改进均与蒸气喷射抽除气体的作用原理相符,因此就解决了对于已存的两种不同的作用原理(扩散作用及喷射作用)的争论。经验表明,同一只喷口能在很大的压强范围内工作。调整喷口的环形间隙,及射流的强度与速度,就可使泵在任一所需的压强区内以最佳的效率进行工作。毫无疑问,高真空泵及喷射泵均可以借适当改变加热条件而使具有相近的抽速性能^[27]。

由于泵的工作在很大程度上取决于喷射作用,因此要求产生高速的均匀